

Udo Mellentin

Klimasignale regionaler Klimaprojektionen für Sachsen

1 Einleitung

Auswertungen aktueller Daten zeigen, dass sowohl der Anstieg der CO₂-Emissionen als auch dessen Auswirkungen die bisherigen Annahmen zum Klimawandel übertreffen, wie sie noch Anfang 2007 im 4. Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) im gegenseitigen Konsens von Wissenschaft und Politik veröffentlicht wurden. Anzeichen für eine beginnende Abnahme der CO₂-Senkenfunktion der Meere, unerwartete Rückgänge des arktischen Meereises in den Sommern 2007 und 2008, Methanemissionen auftauender Permafrostböden sowie sich erwärmender Schelfmeergebiete und der Verlust von Wäldern sind Beispiele für eine unerwartet dynamische Entwicklung, alle mit positiver Rückkopplung zur gegenwärtigen Erwärmung. Die „worstcase“-Szenarien der Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert, welche im 4. Sachstandsbericht des IPCC zu einer Spanne der globalen Erwärmung von 1,1 K bis 6,4 K führten, unterschätzten die gegenwärtige Dynamik. Die Klimaprojektionen zum 5. Sachstandsbericht des IPCC, welcher 2014 erscheinen soll, müssen um pessimistischere Szenarien und Schlussfolgerungen ergänzt werden, um mögliche Konsequenzen fehlenden Klimaschutzes tatsächlich aufzeigen zu können.

Die momentan vorliegenden Ergebnisse der regionalen Klimamodelle sind vor diesem Hintergrund zu interpretieren. Anhand zukünftig erstellter Projektionen des Klimawandels wird eine Neubewertung des gegenwärtigen Sachstandes erfolgen müssen.

2 Globale Klimamodelle

Globale Klimamodelle sind unersetzbare Werkzeuge für Trendabschätzungen und zur

Beurteilung der Gewichte einzelner Klimafaktoren. Die Klimaprojektionen stehen dabei immer unter dem Vorbehalt der zugrunde liegenden Annahmen und des aktuellen Wissensstandes.

Grundsätzlich müssen zur Klimaprojektion in die Zukunft Annahmen über mögliche Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre getroffen werden. Dazu sind vom IPCC über 30 Zukunftsszenarien für den Zeitraum 2001 bis 2100, basierend auf unterschiedlichen Annahmen über den demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel, entwickelt worden. Im 4. Sachstandsbericht des IPCC wurden die Emissionsszenarien mit den Abkürzungen B1, A1B und A2 für Klimaprojektionen ausgewählt. Das Emissionsszenario B1 beschreibt einen moderaten Emissionspfad mit deutlich abnehmenden CO₂-Emissionen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts. Das Emissionsszenario A2 gehört mit einem stetigen Anstieg der CO₂-Emissionen über das gesamte 21. Jahrhundert zu den pessimistischen Szenarien, welche seit 2004 jedoch alle vom realen Anstieg der CO₂-Emissionen übertroffen werden.

Bereits mit einfachen Energiebilanzmodellen (EBM) können grundlegende Zusammenhänge, zum Beispiel zwischen steigenden CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre und deren Wirkung auf den Strahlungs- und Energiehaushalt, modelliert werden.

Mittlerweile werden Klimaprojektionen von dynamischen Modellen (GCM – general circulation model) mit zunehmender Komplexität erstellt. Sollen sie die wichtigsten klimarelevanten physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse in der Atmosphäre, den Ozeanen und auf der Erdoberfläche prozessorientiert modellieren, werden sie auch als „Erdsystemmodell“ bezeichnet. Für den globalen Raumbezug

Statistische Analysen meteorologischer Zeitreihen belegen für Sachsen Veränderungen der Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag. Um die weitere Entwicklung abzuschätzen, können Modellsimulationen genutzt werden. Dieser Beitrag geht auf die grundlegenden Methoden der globalen und regionalen Klimamodellierung ein. Anhand jahreszeitlich differenzierter Trends in simulierten und gemessenen Daten werden Klimaänderungssignale im 20. und 21. Jahrhundert für Sachsen dargestellt.

Aufgrund der durch die verschiedenen regionalen Klimamodelle projizierten klimatischen Entwicklungen, sollten Klimawandelszenarien und Studien über zukünftige Klimaauswirkungen auf Ensembles verschiedener Modelle zurückgreifen. Auf diesem Wege ist es möglich, die sich aus den Klimaprojektionen ergebenden Unsicherheiten umfassender zu beurteilen.

Statistical analysis of meteorological time series provides proof of changes in temperature and precipitation in Saxony, Germany. To be able to estimate the further development, regional climate model simulations (RCMs) can be applied. This paper investigates the methods of global and regional climate modelling.

Seasonal trends in observed and simulated climate change signals for the 20th and 21st century are presented for the area of the federal state of Saxony.

Given the differing climate projections produced by the individual models, climate change scenarios and climate impact studies should be based on an ensemble of model output data from different RCMs, which will then enable more comprehensive evaluation of their uncertainties.

können solche Modelle aufgrund begrenzter Rechnerkapazitäten nur in sehr geringer Auflösung (horizontale Gitterauflösung derzeit ab ca. 110 km bis zu mehreren hundert Kilometern) betrieben werden. Aussagen zu regionalen und lokalen Klimaänderungen sind bei dieser Auflösung nicht möglich. Für Klimaprojektionen auf der regionalen Ebene müssen daher globale Klimamodelle und Regionalisierungsverfahren zusammen eingesetzt werden. Als zuverlässigster Teil der globalen Klimamodelle können die simulierten atmosphärischen Strömungsmuster angesehen werden, welche somit als Antrieb für höher aufgelöste Regionalmodelle zur Verfügung stehen.

3 Regionale Klimamodelle

Zur regionalen Projektion des Klimawandels in Sachsen werden derzeit drei Methoden angewandt. Dies sind die dynamisch-deterministischen, die dynamisch-statistischen und die statistischen Verfahren. Beim dynamischen Downscaling erfolgt ein Herunterskalieren der globalen Ergebnisdaten des GCMs auf eine feinere regionale Auflösung. Jede Methode besitzt spezifische Stärken und Grenzen der Interpretierbarkeit. Strategien zur Anpassung an Klimaänderungen auf der Grundlage von Klimaprojektionen müssen die Grenzen der jeweils verwendeten Verfahren kennen und berücksichtigen.

3.1 Dynamisch-deterministisches Downscaling

Dynamische regionale Klimamodelle (RCM) basieren auf den gleichen Prinzipien wie GCMs, betrachten jedoch nur einen räumlichen Ausschnitt, zum Beispiel Europa, in höherer Auflösung. Die Randbedingungen für das Modellgebiet im RCM werden von einem GCM übernommen. Sowohl die Änderungen der atmosphärischen Strömungsmuster als auch die synoptische Klimatologie im GCM haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Ergebnisse der RCM.

Die für Sachsen vorliegenden regionalen Klimaprojektionen des dynamisch-deterministischen Downscalings mit den Modellen REMO [8] und CLM sind vom globalen Klimamodell ECHAM5/MPI-OM angetrieben.

Das regionale Klimamodell REMO ist ein „hydrostatisches“ Modell, das heißt, die Vertikalbewegung wird über die Massenerhaltung diagnostiziert. Die horizontale Gitterauflösung ist damit auf maximal etwa 10 km beschränkt. Subskalige Prozesse bis hin zur molekularen Skala, wie die Bildung und das Anwachsen von Niederschlagspartikeln, entziehen sich einer direkten Simulation im Gitter des Modells und müssen über Parameterisierungen beschrieben werden.

Das regionale Klimamodell CLM ist ein „nicht-hydrostatisches“ Modell, das heißt, die Vertikalbewegung wird prognostisch mitgerechnet. Das ermöglicht theoretisch Gitterauflösungen bis 0,1 km und damit eine wesentlich bessere Simulation konvektiver und orografisch bedingter Strömungsstrukturen. Sinnvoll ist dies aber nur, wenn die dazu notwendigen Parameter (z. B. Orografie, Bodenphysik, Oberflächenrauigkeit, Landnutzung) vorliegen und der erhöhte Rechenaufwand geleistet werden kann. Derzeit wird CLM mit einer horizontalen Gitterauflösung von ca. 18 km gerechnet.

3.2 Statistisches Downscaling

Mit dem statistischen Regionalmodell STAR [10] liegen Projektionen des Klimawandels in Sachsen für das

Emissionsszenario A1B vor. Der Ansatz von STAR besteht darin, die regionale Klimaentwicklung zum Beispiel aus dem Temperaturtrend einer globalen Projektion zu übernehmen. Unter Verwendung von Beobachtungsdaten und einer Leitgröße, zum Beispiel der Temperatur, wird dann eine regionale Klimaprojektion entwickelt.

Voraus geht die Annahme, dass sich das Klima in den nächsten Jahrzehnten vom heutigen Zustand nicht allzu weit entfernt. Damit kann die Witterung der Zukunft unter bestimmten Voraussetzungen auch aus Beobachtungsdaten der Vergangenheit generiert werden. Zuerst wird die Temperaturentwicklung der nächsten Jahrzehnte zum Beispiel aus einem GCM vorgegeben. Dann kann man beobachtete Witterungsperioden so zusammensetzen, dass sie den angenommenen Temperaturtrend wiedergeben. Die anderen meteorologischen Größen müssen plausibel mitgeführt werden, sodass sich eine räumlich und physikalisch formal konsistente Klimaentwicklung ergibt. Dazu werden unter anderem Monte-Carlo-Simulationen, Cluster-Analysen und verschiedene statistische Testmethoden angewandt.

Der fehlende Zusammenhang sowohl zwischen dem Niederschlag und der Regionaltemperatur als auch den großräumigen atmosphärischen Zustandsvariablen muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Ab Mitte des 21. Jahrhunderts ist mit Veränderungen der Charakteristik der atmosphärischen Strömung und Zustandsgrößen in einem Maße zu rechnen, dass die den heutigen Beobachtungsdaten zugrunde liegenden Annahmen ihren Gültigkeitsbereich verlassen könnten. Die Projektionen des statistischen Downscalings mit STAR gehen bis 2060.

3.3 Dynamisch-statistisches Downscaling

Auch das Klima Sachsens wird erheblich von der Häufigkeit und der jahreszeitlichen Verteilung der mit den atmosphärischen Zirkulationsprozessen verbundenen Wetterlagen bestimmt. Auf Änderungen der großräumigen Zirkulation reagieren die klimatologischen Charakteristiken in Sachsen äußerst empfindlich, was auf die Ausrichtung der Mittelgebirge in und um Sachsen und der damit verbundenen Stau- und Föhngebiete zurückzuführen ist. Die für die Luv-Lee-Verhältnisse der Mittelgebirge ausschlaggebende Anströmrichtung führt bei Änderungen der Häufigkeiten zum Beispiel von Nordwest-, Südwest- oder Westwetterlagen zu räumlich sehr differenzierten Niederschlagstrends. Schon auf engem Raum treten dabei deutliche Unterschiede der Niederschlagsmenge und -häufigkeit auf. Künftige Klimaänderungen in Sachsen werden offensichtlich mit Veränderungen der Zirkulationsverhältnisse bzw. der Veränderung der Häufigkeiten und Andauer der Großwetterlagen gekoppelt sein. Es stellt sich folglich die Frage, inwieweit sich gegenwärtig zu beobachtende Tendenzen und Trends einer Zirkulationsumstellung in Zukunft fortsetzen werden. Hinzu kommen noch Änderungen des Wettergeschehens innerhalb der Wetterlagen. Die dynamisch-statistische Regionalisierungsmethode WETTREG ist in der Lage, auch diese atmosphärischen Verhältnisse zu berücksichtigen [9].

Um belastbare Aussagen über das zukünftige Klima in den verschiedenen Regionen Sachsens treffen zu können, benötigt man Projektionen der voraussichtlichen Häufigkeits- und jahreszeitlichen Verteilung der Großwetterlagen in den nächsten Jahrzehnten. Die hierfür erforderlichen Projektionen der atmosphärischen Zustandsgrößen (Prädiktoren) liefern die GCMs. Das sächsische

Regionalisierungsverfahren WEREX III [2] nutzt die Modelloutputs von ECHAM4/OPYC3, WEREX IV [3] bzw. WETTREG [12] des Nachfolgers ECHAM5/MPI-OM. WETTREG setzt eine objektive Wetterlagenklassifikation für Temperatur und Niederschlag ein und übernimmt die Verteilung der atmosphärischen Strömungsmuster für die Simulation der regionalen Klimaprojektion aus dem GCM [9]. Die Herleitung der objektiven Wetterlagen basiert auf Reanalysen beobachteter atmosphärischer Zustandsgrößen, welche von den meteorologischen Organisationen NCEP/NCAR bzw. ECMWF bereitgestellt werden, in Verbindung mit den am Boden gemessenen meteorologischen Beobachtungsdaten. Wesentlichen Einfluss auf die Güte der Klimaprojektionen mit WETTREG haben Dichte und Qualität der gemessenen Bodendaten. Mit den speziell für Sachsen optimierten objektiven Wetterlagen wird das Regionalmodell WETTREG bisher als WEREX bezeichnet.

4 Rezenter Klimawandel in Sachsen – Quo vadis?

Regionale Folgen des Klimawandels liegen in einem Ereigniskorridor, welcher sich aus den gewählten Emissionsszenarien, den zur Klimaprojektion genutzten globalen und regionalen Klimamodellen sowie der spezifischen Unsicherheit der Impactmodellierung ergibt.

Die jahreszeitliche Ausprägung von Richtung, Ausmaß und Geschwindigkeit der Klimaänderungen werden auch in Sachsen das zukünftige Klima bestimmen. Theoretisch könnten zum Ende des 21. Jahrhunderts in Sachsen das subtropisch-feuchtwarme Klima der Ostseiten der Kontinente, ein dem heutigen mediterranen Klima ähnliches Klima, ein wintermildes Steppenklimate oder ein neuartig geprägtes Klima herrschen.

In der Klimaforschung ist man sich einig, dass der Anstieg der globalen Mitteltemperatur bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf 560 ppm im Bereich von 2 K bis 4,5 K, mit hoher Wahrscheinlichkeit jedoch um 3 K liegt [6]. Ein regionaler Temperaturanstieg in Sachsen deutlich über diesem Niveau ist aufgrund der geographischen Lage und des gegenwärtig rasanten Anstieges der weltweiten CO₂-Emissionen eine realistische Projektion.

Für die Klimafolgenforschung ist die *jahreszeitliche Ausprägung* der Klimaveränderungen von Bedeutung. So

hätten weiterhin auch kalte Winter bei wesentlich wärmeren Sommern andere Auswirkungen als zum Beispiel zunehmend mildere Winter bei gleichen Sommertemperaturen. Beide Fälle könnten mit demselben Anstieg der Jahresmitteltemperatur verbunden sein. Während regionale Klimaschwankungen der Vergangenheit jahreszeitlich unterschiedlich geprägt sein konnten, zeigen in Sachsen momentan alle Jahreszeiten Erwärmungstendenzen, welche je nach zugrunde liegendem Trendzeitraum unterschiedlich akzentuiert sind.

Die größten Unsicherheiten weisen Projektionen des Niederschlags auf. Die hohe, natürliche Variabilität führt hier zu einem „Rauschen“, welches die Analyse von Änderungstendenzen erschwert. GCMs projizieren Niederschlagsabnahmen im mediterranen Raum sowie feuchtere Verhältnisse im Norden Europas. Das bedeutet für Mitteleuropa als Übergangszone gegensätzlicher Tendenzen zusätzliche Unsicherheiten. Globalmodelle lassen erkennen, dass zur Mitte des 21. Jahrhunderts erwärmungsbedingte Verschiebungen der atmosphärischen Zirkulationsmuster zwischen Äquator und Nordpol so weit fortgeschritten sein könnten, dass in Sachsen im Sommer mit wesentlich verminderten Niederschlagsmengen zu rechnen ist. Dabei sind abrupte Veränderungen nicht auszuschließen. Selbst bei unveränderten Niederschlagsbedingungen in Sachsen wird der mit einer Erwärmung verbundene Anstieg des Verdunstungsanspruches der Atmosphäre einen zunehmend angespannten Wasserhaushalt zur Folge haben. Perspektivisch ist ein regional unterschiedlich ausgeprägter, weiterer Rückgang des Wasserdargebotes insbesondere im Sommerhalbjahr sehr wahrscheinlich.

Paläoklimatische Untersuchungen belegen, dass bei weiterem unvermindertem Anstieg der weltweiten CO₂-Emissionen die sich bereits heute andeutende *Geschwindigkeit der Erwärmung* für das 21. Jahrhundert äußerst kritisch zu bewerten ist. Der Wechsel vom Pleistozän zum Holozän war mit einem Anstieg der Globaltemperatur in einer Unsicherheitsspanne von 4 K bis 7 K innerhalb von 5000 Jahren verbunden [7]. Schon eine Erwärmung um 2 K im Laufe des 21. Jahrhunderts würde einen deutlich rasanteren Temperaturanstieg bedeuten als der des Übergangs von der letzten Eiszeit in die gegenwärtige Warmzeit. Absolut unvorstellbar sind die Konsequenzen, welche mit einem nicht mehr auszuschließenden Anstieg der Globaltemperatur im 21. Jahrhundert um 8 K verbunden wären.

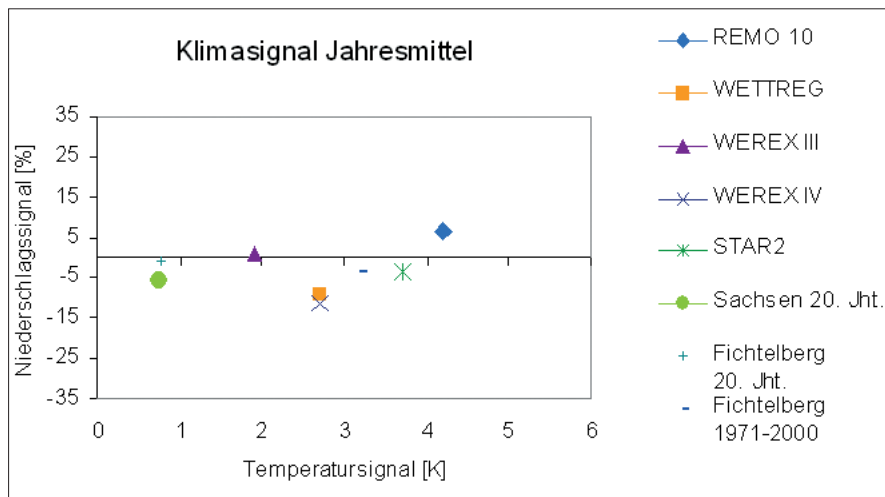


Bild 1. Auf 100 Jahre normiertes Temperatur-Niederschlags-Klimasignal im Jahresmittel für Sachsen (Beobachtungszeitraum 1901 – 2006, Projektionszeitraum 2001 – 2100 unter Emissionsszenario A2; STAR 2001 – 2060 unter Emissionsszenario A1B) und die Station Fichtelberg (Beobachtungszeitraum 1901 – 2006, 1971 – 2000)

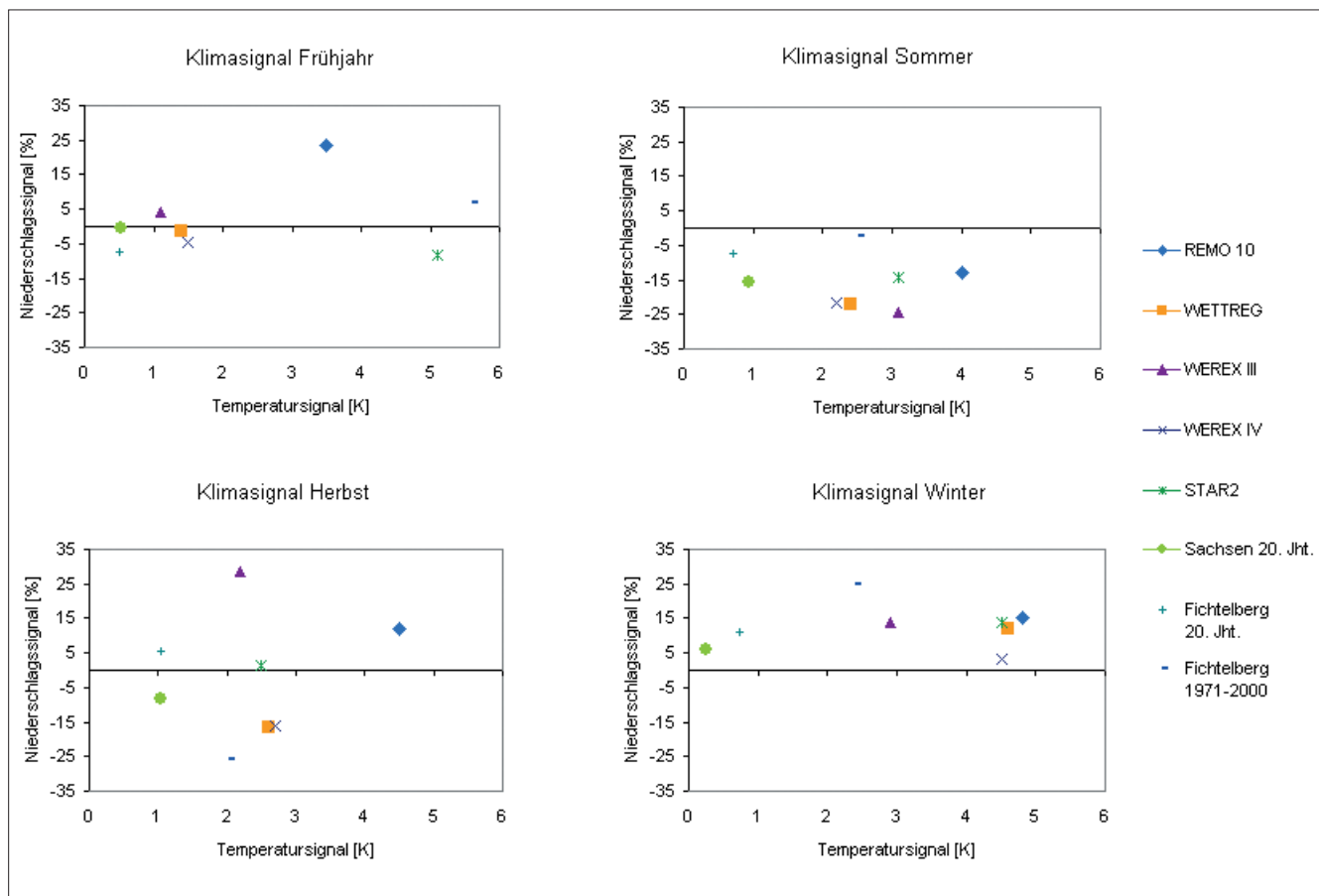


Bild 2. Auf 100 Jahre normiertes Temperatur-Niederschlags-Klimasignal in den Jahreszeiten für Sachsen (Beobachtungszeitraum 1901 – 2006, Projektionszeitraum 2001 – 2100 unter Emissionsszenario A2; STAR 2001 – 2060 unter Emissionsszenario A1B) und die Station Fichtelberg (Beobachtungszeitraum 1901 – 2006, 1971 – 2000)

5 Klimaänderungssignale regionaler Klimamodelle für Sachsen

Klimasignale können grundsätzlich nichts über den Verlauf der Veränderungen und die Schwankungsbreite der Parameter aussagen. Sie stellen ausschließlich einen Wert der Stärke von mittleren Klimaveränderungen dar. Die Klimaänderungssignale der regionalen Klimaprojektionen im Zeitraum 2001 bis 2100 (Bilder 1 und 2) ergeben sich aus dem linearen Trend der über Sachsen gemittelten Dekadenmittelwerte von Temperatur (absolut) und Niederschlag (relativ). Zur Vergleichbarkeit der Trendstärke in verschiedenen Zeiträumen wurden die Werte für das Modell STAR (2001 – 2060), der Station Fichtelberg (1901 – 2000, 1971 – 2000) und der im Zeitraum 1901 bis 2006 vom Deutschen Wetterdienst analysierte Trend der sächsischen Mittelwerte für Temperatur und Niederschlag auf 100 Jahre normiert. Während sich für den Temperaturtrend vom sächsischen Tiefland bis zu den Kammlagen räumlich nur geringe Unterschiede andeuten, sind bei der Interpretation von Niederschlagstrends jahreszeitlich und räumlich heterogene Strukturen innerhalb Sachsens zu berücksichtigen. Vom mittleren Niederschlagstrend Sachsens kann nicht auf lokale Verhältnisse geschlossen werden, wie das Beispiel der Station Fichtelberg belegt.

Außer bei STAR (ECHAM5/MPI-OM, A1B) und WEREX III (ECHAM4/OPYC3, A2) basiert der Antrieb der dargestellten Regionalmodellergebnisse auf dem Global-

modell ECHAM5/MPI-OM und dem Emissionsszenario A2. Ein Vergleich der Modellergebnisse zeigt, dass sie bei gleichen Emissionsszenarien zum Teil erheblich voneinander abweichen. Hier kommen die unterschiedlichen physikalischen bzw. statistischen Eigenschaften der Modelle zum Tragen.

5.1 Jahr

Das 20. Jahrhundert weist sowohl im Sachsenjahresmittel als auch an der Station Fichtelberg eine übereinstimmende Tendenz der Erwärmung und geringen Abnahme des mittleren Jahresniederschlags auf (Bild 1). Anhand der Station Fichtelberg wird die sich verstärkende Erwärmung zum Ende des 20. Jahrhunderts von unter 1 K/100a auf über 3 K/100a belegt. Damit befindet sich der Temperaturanstieg in Sachsen bereits heute in der Größenordnung von 2 K/100a bis 4 K/100a, welche für Sachsen erst unter den wesentlich höheren CO_2 -Konzentrationen des 21. Jahrhunderts projiziert werden. Ein Vergleich mit Trendausagen aus globalen Klimamodellen zu Mitteldeutschland [4] lässt eine Erwärmungstendenz im oberen Bereich der Unsicherheitsspanne plausibel erscheinen.

Die Entwicklung des Jahresniederschlags weist über das 21. Jahrhundert eine Tendenz zur leichten Abnahme auf. Dahinter verbirgt sich eine Umverteilung des Niederschlags vom Sommerhalbjahr in den Winter.

5.2 Frühjahr

Das Frühjahr im 20. Jahrhundert weist im Sachsenmittel und an der Station Fichtelberg eine übereinstimmende Trendstärke der Erwärmung von 0,5 K/100a auf (Bild 2). Die Station Fichtelberg zeigt für den Zeitraum 1971 bis 2000 eine Verzehnfachung dieser Trendstärke auf über 5 K/100a. Die Projektionen für das 21. Jahrhundert liegen in einer Spanne von 1 K/100a bis 5 K/100a. Aussagen zum weiteren Verlauf der Erwärmung des Frühjahres weisen im Rahmen der Klimaszenarien eine hohe Unsicherheit auf.

Die Entwicklung des Niederschlags im Frühjahr über Sachsen gemittelt weist im 20. Jahrhundert keine Tendenzen auf. Die Station Fichtelberg macht jedoch lokal unterschiedliche Entwicklungen deutlich. Für das Niederschlagssignal der Übergangsjahreszeiten im 21. Jahrhundert sind die Projektionen unterschiedlicher Regionalisierungsverfahren uneinheitlich. Es besteht eine hohe Unsicherheit in der Aussage der Projektionen.

5.3 Sommer

Der Sommer im 20. Jahrhundert weist im Sachsenmittel und an der Station Fichtelberg eine übereinstimmende Trendstärke der Erwärmung von nahezu 1 K/100a auf. Die Station Fichtelberg zeigt für den Zeitraum 1971 bis 2000 in etwa eine Verdreifachung dieser Trendstärke auf über 2,5 K/100a. Die Projektionen für das 21. Jahrhundert liegen in einer Spanne von 2 K/100a bis 4 K/100a. Bei einer weiteren, ausgeprägten Erwärmung ist in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts in Mitteleuropa mit neuartigen „Hitzewetterlagen“ zu rechnen [11]. Ein Klimasignal von 8 K/100a für den Sommer ist dann nicht mehr ausgeschlossen.

Die Abnahme des sommerlichen Niederschlags im 20. Jahrhundert, sowohl über Sachsen gemittelt als auch an der Station Fichtelberg, stellt die deutlichste beobachtete Tendenz in den vier Jahreszeiten dar. Für das Niederschlagssignal im 21. Jahrhundert liefern die Projektionen übereinstimmend eine Fortsetzung der kritischen Entwicklung. Im sächsischen Tiefland kann das eine Halbierung des mittleren Sommerniederschlags bedeuten. Es kann von einer robusten Aussage der regionalen Projektionen ausgegangen werden.

Im Zeitraum 1971 bis 2000 weist der Sommerniederschlag an der Station Fichtelberg keine Trends auf. Für die Analyse genereller Tendenzen der Niederschlagsentwicklung ist dieser Zeitraum zu kurz und damit ungeeignet.

5.4 Herbst

Der Herbst im 20. Jahrhundert weist sowohl im Sachsenmittel als auch an der Station Fichtelberg eine übereinstimmende Trendstärke der Erwärmung von 1 K/100a auf. Die Station Fichtelberg zeigt für den Zeitraum 1971 bis 2000 eine Verdopplung der Trendstärke auf 2 K/100a. Die Projektionen für das 21. Jahrhundert liegen in einer Spanne von 2 K/100a bis 4,5 K/100a. In der weiteren Entwicklung der Erwärmung des Herbstes besteht eine hohe Unsicherheit. Ein abrupter Erwärmungsschub mit anschließend über weite Phasen des 20. Jahrhunderts stagnierendem bis leicht abnehmendem Temperaturniveau kennzeichnete den Herbst.

Die Entwicklung des Niederschlags im Herbst über Sachsen gemittelt weist im 20. Jahrhundert leicht abnehmende Tendenzen auf. Die Station Fichtelberg weicht je nach Trendzeitraum lokal von dieser Entwicklung ab. Im Zeitraum 1971 bis 2000 ist ein deutlicher Rückgang der Niederschläge an der Station Fichtelberg zu erkennen. Auch im Herbst bestätigt sich, dass die Niederschlagssignale der

Übergangsjahreszeiten im 21. Jahrhundert aus den Projektionen unterschiedlicher Regionalisierungsverfahren uneinheitlich sind. Es besteht eine hohe Unsicherheit in der Aussage der Projektionen.

5.5 Winter

Der Winter im 20. Jahrhundert weist im Sachsenmittel im Vergleich zur Station Fichtelberg eine abgeschwächte Trendstärke der Erwärmung auf. Beide Werte liegen unter 1 K/100a. Die Station Fichtelberg zeigt für den Zeitraum 1971 bis 2000 eine Verdreifachung der Trendstärke auf über 2 K/100a. Die Projektionen für das 21. Jahrhundert liegen in einer Spanne von 3 K/100a bis 5 K/100a. Für deutlich höhere Werte liegen derzeit keine Anzeichen vor, sie können aber grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden. Der Winter wird in den Klimaprojektionen mit ca. 4,5 K/100a Erwärmungssignal ungewöhnlich übereinstimmend als die Jahreszeit mit der stärksten zu erwartenden Erwärmung klassifiziert. Studien zum Verhalten des Nordatlantikstroms ergeben bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ein Schwächung um 30 % als plausible Annahme. Für Sachsen kann das eine Dämpfung der Erwärmung im Winter mit sich bringen.

Die leichte Zunahme des winterlichen Niederschlags im 20. Jahrhundert stellt im Vergleich zu den anderen Jahreszeiten eine sehr einheitliche Tendenz dar. Regional sehr trockene (2000/2001) als auch sehr feuchte Winter (1998/1999, 1999/2000) bezeugen allerdings eine hohe Variabilität innerhalb dieses Trends. Für das Niederschlagssignal im 21. Jahrhundert liefern die Projektionen übereinstimmend eine Fortsetzung dieser Entwicklung. Hier kann von einer robusten Aussage der regionalen Projektionen ausgegangen werden. Das Ausmaß der Zunahme des Winterniederschlags ist jedoch sehr unsicher.

6 Umgang mit Unsicherheiten regionaler Klimaprojektionen

Die Bandbreite der regionalen Klimaprojektionen erfordert einen begründeten Umgang mit Unsicherheiten. Erste Ansätze wurden in diesem Beitrag bereits berücksichtigt. Dazu gehören die Einbeziehung der in Beobachtungsdaten diagnostizierten Entwicklungen und die Anwendung möglichst vieler Regionalisierungsverfahren. Weiterhin sind Ensemble-Rechnungen zu einzelnen Emissionsszenarien anhand der Kombinationen unterschiedlicher GCMs und RCMs für probabilistische Aussagen sinnvoll. Zur Plausibilitätsprüfung und Interpretation der Klimaprojektionen sind Kenntnisse der Modellierungstechnik und der regionalen und globalen meteorologisch-klimatologischen Verhältnisse notwendig.

Zu beachten sind die Grenzen der modellspezifischen Belastbarkeit von Klimaprojektionen. Je nach kurz- bis langfristigem Projektionshorizont kann die tatsächliche Klimaentwicklung durch noch nicht ausreichend verstandene Effekte beeinflusst werden. Solche Effekte sind unter anderem Diskontinuitäten (abrupte Änderungen), Rückkopplungen, die natürliche Klimavariabilität (Vulkanausbruch, Meeresströmungen, dekadische Schwankungen), Extremereignisse und die unterschiedliche Klimasensitivität von Modellen. Der Unsicherheitsbereich kann mit zukünftigem Wissen auch zunehmen, zum Beispiel wenn neue Erkenntnisse bisher nicht erwartete Entwicklungen plötzlich als möglich erscheinen lassen.

Die Aktualisierung des hier vorliegenden Vergleichs der regionalen Projektionen ist sinnvoll, sobald aus weiterentwickelten globalen und regionalen Klimamodellen qualitativ neue Projektionen vorliegen. Derzeitig besteht mit dem speziell auf die sächsischen Verhältnisse zugeschnittenen dynamisch-statistischen Regionalisierungsverfahren WEREX ein geeigneter Ansatz [1], Basisdaten für wasserwirtschaftliche, ökologische, forst- und landwirtschaftliche Fragestellungen zur Verfügung zu stellen.

Deutlich wahrnehmbare Anzeichen der Auswirkungen eines rasanten Klimawandels in Sachsen könnten bereits in nicht mehr allzu weiter Ferne aus den Wäldern kommen. Die vom Menschen gemachte Klimaänderung könnte so schnell über die Vegetation hereinbrechen, dass eine natürliche Anpassung wie bei sich langsam wandelnden Bedingungen in der Vergangenheit ausgeschlossen ist. Die heute naturfernen Forstökosysteme und die durch die Kulturlandschaft behinderte Migration von Tier- und Pflanzenarten sind in diesem Fall zusätzliche Stressfaktoren.

Die gegenwärtigen Erkenntnisse zu klimatischen Veränderungen in Sachsen sind sehr ernst zu nehmen und erfordern ein individuelles, gesellschaftliches und politisches Handeln. Viele offene Fragen machen eine nachhaltig geförderte Klima- und Klimafolgenforschung notwendig. Um die globale Erwärmung gemäß der politischen Willensbekundung der EU [5] in einem erträglichen Ausmaß zu halten (unter 2 K im Vergleich zum vorindustriellen Niveau), darf die Konzentration der CO₂-Äquivalente in der Atmosphäre den Grenzwert von ca. 450 ppm am Ende des 21. Jahrhunderts nicht überschreiten. Bereits damit sind Klima-, Witterungs- und Wetteränderungen verbunden, auf die wir bisher nicht eingestellt sind.



Mellentin, Udo

Dipl.-Ing.

Studium Hydrologie von 1988 bis 1993 und der Wasserbewirtschaftung von 1990 bis 1995 an der TU Dresden ♦ 1993 Studienabschluss als Diplom-Hydrologe ♦ 1995 Studienabschluss als Diplom-Ingenieur ♦ seit 2004 tätig im Sachgebiet Klimawandel, Klimafolgen am Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Literatur

- [1] Bartels: Ergebnisse und Bewertung verschiedener regionaler Klimaszenarienberechnungen aus dem Projekt KLIWA „Klimaänderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“. Vortrag zum 1. KLARA-Symposium am 7. Juli 2004 in Stuttgart
- [2] Enke, W.: Abschlussbericht: Erweiterung der Sächsischen Klimaprognose WEREX II für das Zeitfenster 2050 bis 2100 für die Emissionsszenarien B2 und A2 (WEREX 2100). Forschungsbericht. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2004
- [3] Enke, W.; Schneider, F.; Deutschländer, Th.: A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. In: Theor. Appl. Climatol. **82** (2005), S. 51 – 63
- [4] Feske, N.: Globale Klimamodellsimulationen – Vergleichende Analyse für Mitteleuropa und umliegende Gebiete. Schriftenreihe LFULG, 25 (2009)
- [5] Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU. Kommissionsdokument Brüssel: KOM, 29.6.2007
- [6] IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis; Summary for Policymakers. Fourth Assessment Report. Geneva, 2007
- [7] IPCC: Fourth Assessment Report, Work Group 1, Chapter 6. Geneva, 2007
- [8] Jacob, D.; Göttel, H.; Kotlarski, S.; Lorenz, P.; Steck, K.: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 138 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie. Dessau: UBA, 2008
- [9] Küchler, W.: Projektionen des Klimawandels in Sachsen für die Dekade 2041 – 2050. In: Wasser und Boden **11** (2004), S. 10 – 14
- [10] Orłowsky, B.; Gerstengarbe, F.-W.; Werner, P. C.: Past as type case – a resampling scheme for regional climate simulation. In: Theor. Appl. Climatol. (2007), angenommen
- [11] Spekat, A.; Enke, W.; Kreienkamp, F.: Ableitung von Transwetterlagen, Teilbericht zum Vorhaben „Ableitungen von Transwetterlagen und Entwicklung eines interaktiven Diagnose- und Präsentationstools“, 2006
- [12] Spekat, A.; Enke, W.; Kreienkamp, F.: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OMT63L31 2010 – 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Dessau: UBA, 2007

Manuskripteingang: 24.4.2009

Angenommen am: 14.8.2009